ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1967

Seria: ENERGETYKA z. 26 Nr kol. 194

ANTONI GUZIK
Katedra Energetyki Cieplnej

OCENA DOKŁADNOŚCI NIEKTÓRYCH METOD OBLICZANIA WSPÓŁCZYNNIKA PRZEKAZYWANIA CIEPŁA W REGENERATORZE

Streszczenie. Wykorzystując wyniki metody różnicowej wyznaczenia współczynnika przekazywania ciepła [2] przeprowadzono ocenę dokładności obliczania tego współczynnika za pomocą wzorów podanych w literaturze [3, 4, 5, 6, 7]. Największe odchyłki stwierdzone w rozpatrywanym zakresie kontroli zestawiono w tablicy 1.

1. Wprowadzenie

W artykule [2] zamieszczonym w niniejszym zeszycie zostały podane uproszczenia fizyczne przyjęte przy wyznaczaniu współczynnika przekazywania ciepła w regeneratorze. Uproszczenia te są takie same jak u innych autorów [1, 3, 4, 5, 6, 7]. Niektórzy autorzy [1, 3] uwzględniają ponadto wypełnienie regeneratora inne aniżeli wykonane z płyt płaskich oraz rozpatrują wpływ zmienności w czasie temperatury gazów [3, 4, 6, 7]. Jednak podstawowe rozważania są oparte na założeniach przyjętych również przez autora niniejszego opracowania.

Przy matematycznym rozwiązaniu zagadnienia, z uwagi na jego dużą złożoność, przyjmuje się ponadto uproszczenia matematyczne. Konsekwencją tych uproszczeń są odstępstwa wyników od rezultatów prawidłowych.

Uproszczenie matematyczne w pracy [1] polega na przyjęciu jednakowych wartości współczynników wnikania ciepła (czyli liczb Biota) w obu fazach działania regeneratora. Przyjęcie to ogranicza zakres zastosowania metody [1] mimo, że jest ona teoretycznie ścisła.

Ogólne rozwiązanie zagadnienia w pracy [2] uzyskano dzięki zastosowaniu metody różnicowej. W metodzie różnicowej zastępuje się ciągłą zmienność zjawiska w czasie i przestrzeni zmiennością schodkową. Dokładność rezultatów [2] sprawdzono dla jednakowych wartości liczb Biota porównując je z wynikami metody [1]. Uzyskana największa odchyłka względna równa 1,24%, średnia kwadratowa zaś odchyłka dla 75 wartości kontrolnych wynosząca ± 0,35% swiadczą o zadawalającej dokładności metody [2].

Uproszczenia matematyczne innych metod polegają na wykorzystaniu wielkości otrzymanych z eksperymentów [3, 5 , 6], zastąpieniu rzeczywistego rozkładu temperatury wewnątrz materiału wypełnienia w momencie rewersji rozkładem średnim [4], bądź na rozłożeniu temperatury gazów w szereg, którego współczynniki nie zależą od czasu [7].

Kontrolę dokładności metod [3, 4, 5, 6, 7] przeprowadza się wykorzystując wyniki metody [2] dla liczb Biota i Fouriera

Bi = 0,2; 0,4; 1,0; 2,0; 6,0

Fo = 0,2; 0,5; 1,0; 2,5; 5,0

2. Przystosowanie wzorów do obliczeń sprawdzających

Ostateczne wzory służące do obliczenia współczynnika k według metod [3, 4, 5, 6], sprowadza się zgodnie z zależnością

$$k = \delta \varrho c \varkappa \tag{1}$$

do wzorów określających stosunek $\varkappa$. Zmienne występujące w tych wzorach zastępuje się zmiennymi zredukowanymi

$$\alpha = \frac{Bi\,\lambda}{\delta}, \qquad \tau = \frac{Fo\,\delta^2}{a}, \qquad \frac{\alpha \tau}{\delta \varrho c} = Bi\ Fo \tag{2}$$

otrzymując konkretną postać funkcji

$$\varkappa = \varkappa\,(Bi_G, Bi_O, Fo_G, Fo_O) \tag{3}$$

W ujęciu H a u s e n a [3] założenie niezmiennych temperatur gazów jest zastąpione założeniem znikomo krótkiego regeneratora. Wówczas wzór Hausena można sprowadzić do postaci

$$\varkappa = \mathrm{th}\,\frac{\varkappa_i}{1 + M\,\phi\,\varkappa_i} \tag{4}$$

gdzie:

$$\frac{1}{\varkappa_i} = \frac{1}{(\mathrm{Bi\ Fo})_G} + \frac{1}{(\mathrm{Bi\ Fo})_O} \tag{5}$$

dotyczy tzw. regeneratora idealnego,

$$\phi = \frac{1}{6} - \frac{1}{180}\,M \qquad \text{przy } M \leqslant 10$$

lub

$$\phi = \frac{0{,}357}{\sqrt{0{,}3 + M}} \qquad \text{przy } M > 10$$

jest poprawką uwzględniającą szybką zmianę temperatury tuż po rewersji, wielkość zaś M oznacza

$$M = 2\left(\frac{1}{\mathrm{Fo}_G} + \frac{1}{\mathrm{Fo}_O}\right)$$

W metodzie H e i l i g e n s t a e d t a [4] uproszczonej przez Hausena [3] wielkość $\varkappa$ określa wzór

$$\varkappa = \frac{(1 - \varphi_G)(1 - \varphi_O)}{1 - \varphi_G\ \varphi_O} \tag{6}$$

gdzie: po wykorzystaniu (2)

$$\varphi = \exp\,(-\,\mathrm{Bi\ Fo}\ \chi) \tag{7}$$

poprawka zaś $\chi = f\,(\mathrm{Bi},\ \mathrm{Fo})$ jest podana w pracy [4] w postaci wykresu.

R u m m e l [5] wzorując się na współczynniku przenikania ciepła obowiązującym dla rekuperatora, uzależnił współczynnik przekazywania ciepła w regeneratorze od wartości k_i dotyczącej regeneratora idealnego, od tzw. sprawności wypełnienia ϱ oraz od stosunku ξ maksymalnej i średniej różnicy temperatur powierzchni wypełnienia. Na podstawie doświadczeń Rummel ustalił $\xi = 2 \div 3{,}5$ i zaleca w obliczeniach przyjmować $\xi = 2{,}5$. Wykorzystując tę wartość oraz wzory określające k i ϱ otrzymuje się

$$\frac{1}{\varkappa} = \frac{1}{\varkappa_i} + 0{,}4\left(1 + \frac{1}{Fo_C}\right) \tag{8}$$

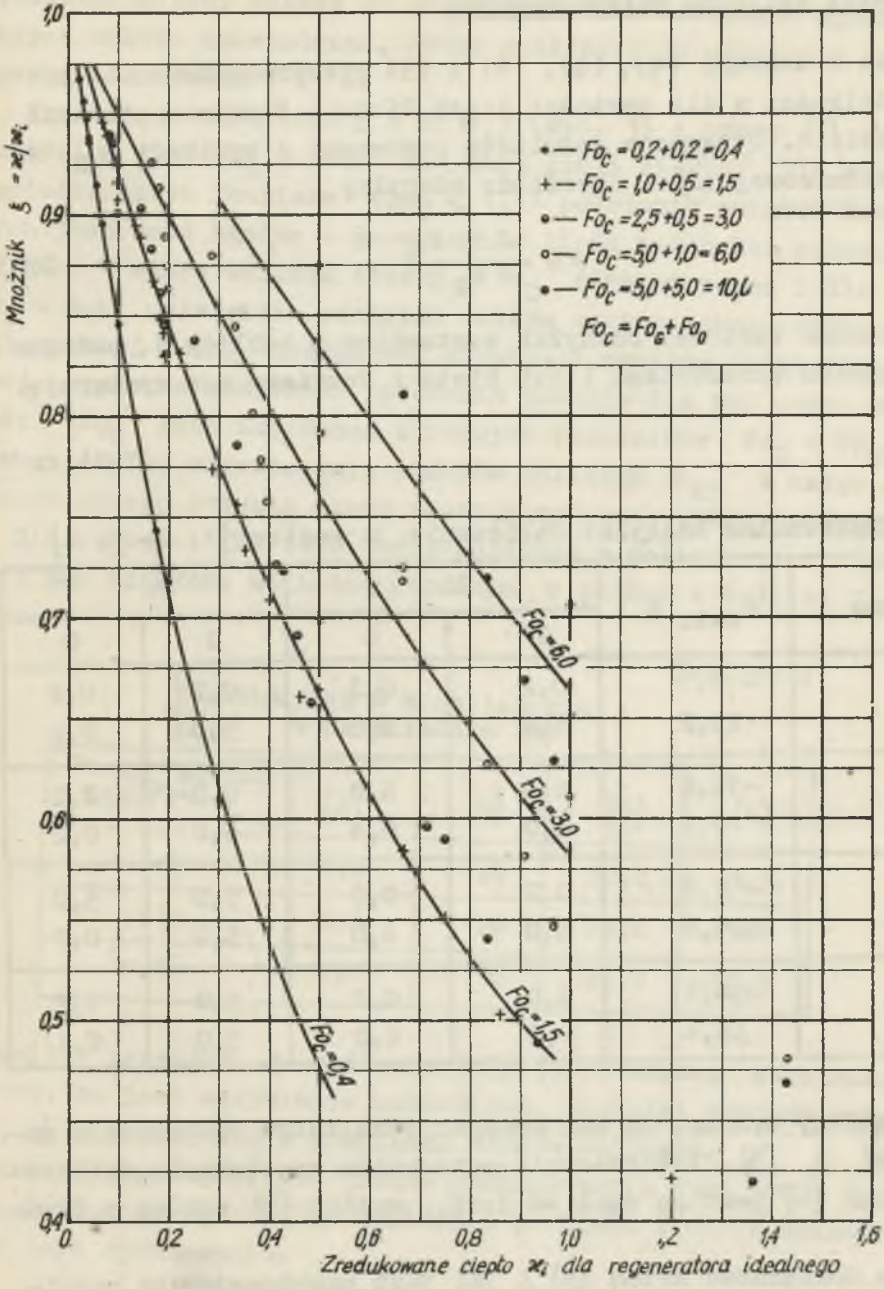
gdzie: $1/\varkappa_i$ według (5), zaś $Fo_C = Fo_G + Fo_O$ dotyczy całego cyklu działania regeneratora.

Ogólny wzór określający współczynnik przekazywania ciepła podany przez S c h a c k a [6] ma postać $\varkappa = \xi\,\varkappa_i$. Poprawka ξ została wyprowadzona przy założeniu wykładniczej zależności temperatury w czasie oraz jednakowej wartości iloczynu $\alpha_G\,\tau_G = \alpha_O\,\tau_O$. W obliczeniach Schack używa iloczynu dotyczącego fazy grzania oraz zaleca przyjmować $e^{-n} \approx 0$. Wówczas

$$\varkappa = \frac{\frac{1}{G}\left(1 - e^{-G}\right)}{1 - \frac{1}{2}\left(1 - e^{-G}\right)\left(1 - \frac{1}{Fo_C}\,\frac{n+G}{n-G}\right) - \frac{G}{Fo_C(n-G)}}\,\varkappa_i \tag{9}$$

gdzie: dla skrócenia zapisu $G = (Bi\ Fo)_G$. Wartość n będącą mnożnikiem przy wykładniku potęgowym funkcji temperatury od czasu, zaleca Schack przyjmować $n = 8$.

Możliwość sprawdzenia wyników otrzymywanych z pracy [7] sprowadza się do kontroli podanego w niej wykresu poprawki $\xi = \varkappa/\varkappa_i$. Wykres ten (rys. 1) zawiera pęk linii $\xi = f(\varkappa_i)$ dla różnych wartości Fo_C = idem.



Rys. 1. Wykres do sprawdzenia metody Timofiejewa, Małkina i Szklara

3. Wyniki obliczeń sprawdzających

Zgodnie z wzorami (4), (6), (8) i (9) przeprowadzono obliczenia wielkości $\varkappa$ dla wartości liczb Biota i Fouriera podanych w punkcie 1. Otrzymane rezultaty porównano z wynikami $\varkappa_R$ metody różnicowej [2] i określono odchyłkę

$$\beta = \frac{\varkappa - \varkappa_R}{\varkappa_R} \tag{10}$$

Ekstremalne wartości odchyłek zestawiono w tablicy 1, podając przy jakich wartościach liczb Biota i Fouriera one występują.

Tablica 1

Ekstremalne odchyłki obliczenia $\varkappa$ według [3, 4, 5, 6]

Metoda	β_{extr} %	Bi		Fo	
		G	O	G	O
[3]	- 1,1 25,2	0,2 6,0	0,2 6,0	0,2 5,0	0,2 0,2
[4]	-16,6 0,5	6,0 6,0	6,0 0,4	0,2 5,0	0,2 0,2
[5]	- 6,4 101,8	0,2 6,0	0,2 6,0	5,0 5,0	5,0 0,2
[6]	-94,1 56,4	6,0 0,2	0,2 6,0	5,0 5,0	0,2 0,2

Z tablicy wynika, że najlepszych rezultatów dostarczają metody [4] i [3]. Powierzchnia ogrzewalna wypełnienia obliczona według [4] jest na ogół za duża, według [3] zaś na ogół mała.

Mała dokładność metod [5] i [6] jest prawdopodobnie rezultatem przyjęcia w nich wzoru Gröbera określającego sprawność

wypełnienia oraz węższy od przyjętego w obliczeniach sprawdzających zakres doświadczeń, które posłużyły do ustalenia empirycznych wartości $\check{c}$ i n.

Naniesione na wykres $\check{c} = f(\varkappa_i)$ (rys. 1) z pracy [7] punkty kontrolne dla Fo_C = idem nie dają linii ciągłej. Dla małych wartości liczb Fouriera ($Fo_C < 1,5$) położenie punktów kontrolnych jest dość zgodne z przebiegiem linii (odchyłka mniejsza od 3%). W miarę wzrostu liczby Fo_C różnice rosną i dla $Fo_C = 6,0$ największa odchyłka osiąga wartość około 23%. Do ostatecznej oceny dokładności korelacji punktów jedną linią jest potrzebna znajomość położenia punktów dla tej samej wartości Fo_C lecz uzyskanej z różnych składników $Fo_G + Fo_O$. Wymagałoby to zagęszczenia punktów obliczeń $\varkappa_R$, z czego z powodu dużego zużycia czasu maszyny cyfrowej, zrezygnowano.

Dla wartości Bi i Fo występujących w obliczeniach nagrzewnicy [2] odchyłkę względną stosunku $\varkappa$ podano w tablicy 2.

Tablica 2

Odchyłka β % obliczenia w przykładzie [2]

Strefa \ Metoda	[3]	[4]	[5]	[6]
1	1,0	1,0	12,2	-3,3
2	2,8	1,0	26,2	-25,8
3	3,0	0	26,9	-39,3

Należy zauważyć, że według metody [5] otrzymano stosunek $\varkappa > 1$, co jest oczywiście niemożliwe. Odchyłki wyników metody [3, 4] mieszczą się w granicach błędów obliczeń.

Autor pragnie wyrazić gorące podziękowanie Panu prof. dr inż. Janowi Szargutowi za wskazanie problemu i cenne wskazówki przy jego opracowaniu.

LITERATURA

[1] GDULA St.J.: Przepływ ciepła w ciałach stałych przy skokowych periodycznych zmianach temperatury ośrodka. Archiwum Budowy Maszyn T. XI. 1964 r. Zeszyt 2.

[2] GUZIK A.: Obliczanie pola powierzchni grzejnej nagrzewnicy wielkopiecowej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Energetyka z. 26

[3] HAUSEN H.: Wärmeübertragung im Gegenstrom, Gleichstrom und Kreustrom. Berlin-Gotingen-Heidelberg - München 1950 r.

[4] HEILIGENSTAEDT W.: Wärmetechnische Rechnungen für Industrieofen, 3 Auflage. Düsseldorf 1951 r.

[5] RUMMEL K.: Berechnung der Wärmespeicher auf Grund der Wärmedurchganszahl, Stahl, z. Eisen 48, 1928 r.

[6] SCHACK A.: Der Industrielle Wärmeübergang, 5 Auflage, Düsseldorf 1957 r. (Przekład rosyjski: Promyszlennaja tiepłopieriedacza, Moskwa 1961 r.).

[7] Timofiejew W.N., Małkin W.M., Szklar F.R.: Tieoria rascziota riegienieratiwnych tiepłoobmiennikow. Tiepło i massopierienos T.V. Mińsk 1963 r.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ НЕКОТОРЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В РЕГЕНЕРАТОРЕ

Р е з ю м е

Используя результаты разностного метода определения коэффициента теплопередачи в регенераторе [2] проводится оценка точности методов расчета других авторов [3, 4, 5, 6, 7]. Оценке подвергаются методы основанные на тех же физических предпосылках, как в работе [2]. Отклонение результатов методов других авторов вытекает из принятых ними математических упрощений. Наибольшие отклонения, наблюденные в рассматриваемом пределе контроля, приведены в таблице.

ACCURACY EVALUATION OF SOME CALCULATION METHODS OF HEAT TRANSFER COEFFICIENT IN A REGENERATOR

S u m m a r y

Using the results of differential method for determining the heat transfer coefficient [2] there carried on the accuracy evaluation of calculation of this coeficient by means of the formulae given in literature [3, 4, 5, 6,7]. The biggest deviations found out in considered checking limits are given in Table 1.